

УДК 621.746.2

С.А. Балан, канд. техн. наук, доц.,
Т.В. Лысенко, канд. техн. наук, доц.,
Е.Г. Трофименко, инженер

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ ПРИ ИСТОЧНИКАХ С ПЕРЕМЕННЫМИ ГРАНИЦАМИ

С.О. Балан, Т.В. Лысенко, О.Г. Трофименко.

Моделювання тепломасопереносу в ливарній формі при джерелах зі змінними границями. Запропоновано фізичну модель заповнення ливарної форми металом у вигляді кліткових автоматів. Приведені принципи та результати схемотехнічного процесу заливки форми.

S.A. Balan, T.V. Lysenko, E.G. Trofimenko.

Modelling of heat-and-mass transfer in a casting mold with variable borders sources. A physical model of filling a casting mold with metal in the form of checkered automatics is proposed. The principles and results of circuitry modelling of casting process are adduced.

При проектировании технологических процессов литейного производства важнейшим этапом является моделирование термических условий охлаждения металла в форме. Время, когда металл находится в форме, с точки зрения термической модели можно разделить на два периода: заливку — площадь контакта и условия на границе между металлом и формой непрерывно изменяются — и охлаждение металла в форме при неизменной площади границ. В зависимости от соотношения продолжительностей этих периодов возможны два подхода. В первом металл считается неподвижным и оказавшимся в форме мгновенно, что гарантирует адекватность модели лишь при относительно большом периоде охлаждения.

При сравнительно быстротечных процессах охлаждения такое допущение, очевидно, неприемлемо. Поэтому во втором подходе стараются учесть перемещение источника тепла в процессе заполнения формы [1]. Необходимость такого решения следует также из того, что в процессе заполнения при всей его скоротечности закладываются основы большинства видов литейных дефектов, а, следовательно, борьба с ними предполагает оптимизацию именно конструктивных и кинетических параметров заполнения формы путем создания адекватных моделей системы «форма — движущийся металл — отливка».

Отличием таких моделей от известных задач нагрева подвижным источником тепла [2] является то обстоятельство, что в процессе заполнения металлом такой источник не только перемещается, но и увеличивается в размерах — действительно, площадь контакта «металл — форма» при этом постоянно растет. Такой источник уже нельзя считать ни точечным, ни подвижным [2], что резко усложняет применение стандартных, справочных формул и алгоритмов для расчета температурных полей внутри формы. Не менее сложным становится и анализ массопереноса в форме, так как мощность источников газовой выделенности зависит от температурных полей, кроме того, при нагреве изменяются и условия фильтрации газов из остающейся незаполненной части полости формы [3].

Проблема усложняется также тем, что термические и гидравлические коэффициенты в высокоинтенсивных процессах тепломассопереноса, развивающихся при заливке, существенно нелинейны, во-первых, из-за своей температурной зависимости, во-вторых, из-за наличия фазовых переходов в кристаллизующейся отливке и прогревающейся форме. Таким образом, моделирование тепломассопереноса при заполнении формы сводится к постановке и решению задачи Стефана с неизвестной границей раздела фаз в нестационарной многомерной постановке [4].

Существующие на сегодняшний день аналитические методы решения такой задачи применимы только к объектам весьма простой конфигурации. К сожалению, литейная форма, содержащая, как правило, один или более стержней, такой конфигурацией практически никогда не обладает. Поэтому весьма перспективными являются численные методы решения задачи Стефана с подвижными границами [5, 6].

В этих условиях полезным может оказаться также физическое (электрическое) моделирование процессов тепломассопереноса с подвижным (переменным) источником тепла, которое сводится к «перемещению» на модели соответствующих точек подвода электрической энергии и переключению резисторов, моделирующих теплоотдачу на границе. В тепловой подсистеме такое переключение моделирует рост площади контакта «металл — форма», а в массовой — рост площади источника газовой выделенности. Одновременно с этим в массовой подсистеме уменьшается количество электрических стоков (заземленных точек), что соответствует снижению площади фильтрации. Точки подвода последовательно замещают точки отвода со скоростью перемещения фронта жидкого металла в форме, чем моделируется скорость заполнения. Наиболее эффективна такая модель, если ее реализация осуществлена не на реальных электрических элементах, а в виде схемотехнической САПР [7].

В разработанной модели учет нелинейности параметров переноса осуществлялся путем перехода к автоматному времени с пересчетом этих параметров после каждой временной итерации и внесением соответствующего изменения в модель.

Положение зеркала металла в форме вдоль вертикальной оси x в конце каждой временной итерации рассчитывали по формуле

$$x_i = x_{i-1} + \frac{l}{\rho} \int_{i-1}^i \int_{\tau-1}^{\tau} \frac{m(\tau)}{F(x)} dx d\tau,$$

где x_i, x_{i-1} — координаты зеркала соответственно на предыдущей и текущей итерациях;

ρ — плотность металла,

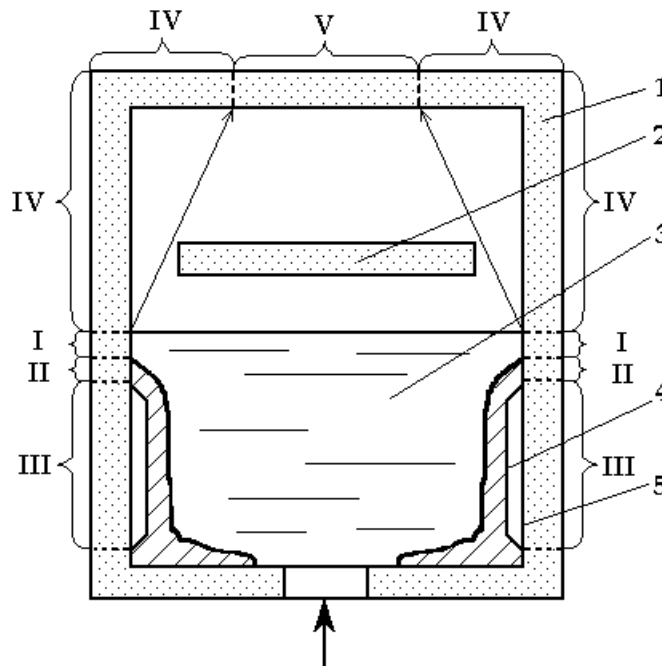
τ_{i-1}, τ_i — временные границы итерации,

$m(\tau)$ — массовая скорость поступления металла в форму,

$F(x)$ — площадь горизонтального сечения системы «отливка — форма» на уровне x_i .

Граничные условия определялись, исходя из пяти вариантов контактной теплопередачи на границе «металл — форма» (рис. 1). Соответственно электрическая схема ячейки теплоотдачи (рис. 2) содержит пять резисторов, переключение которых соответствует изменению контактных условий: R_1 — теплоотдача от жидкого металла 3 к стенке формы 1; R_2 — теплоотдача от твердого металла без зазора между отливкой и формой; R_3 — теплоотдача от твердого металла 4 через образовавшийся в результате усадки зазор между отливкой и формой 5; R_4 — теплоотдача лучеиспусканием от зеркала металла к участкам формы, не контактирующим с металлом; R_5 — теплоотдача отраженным лучеиспусканием от зеркала металла к участкам формы, не контактирующим с металлом и находящимся «в тени» стержня.

Рис. 1. Варианты условий нагрева формы в процессе заливки: I — теплоотдача от жидкого металла; II



— теплоотдача от твердого металла; III — теплоотдача от твердого металла через зазор; IV — теплопередача лучеиспусканием от зеркала металла; V — участок формы «в тени» стержня.

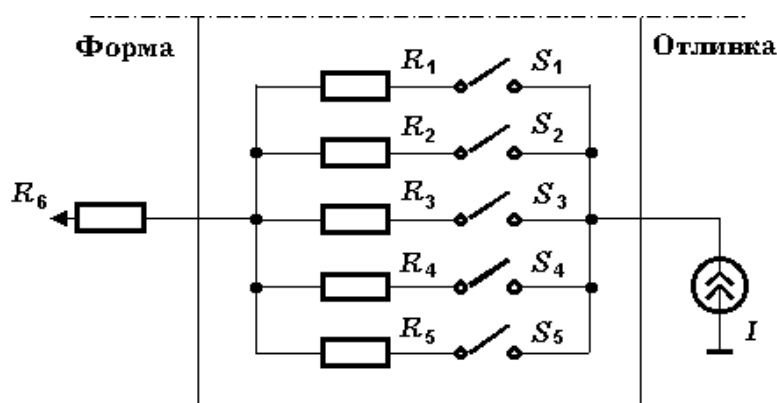


Рис. 2. Принципиальная схема ячейки теплоотдачи электрической модели

Кривая, построенная по результатам моделирования приведен на рис. 3. Песчано-глинистая литейная форма с полостью для отливки размерами 70×50×200 мм имела следующие теплофизические характеристики: эффективная теплопроводность — 0,55 Вт/м·К, эффективная теплоемкость — 1200 Дж/кг·К, заливаемый металл — чугун СЧ20, теплоемкость чугуна — 840 Дж/кг·К, заливка металла — сифонная, время заливки — 9 с, температура заливки — 1550 К, высота расположения стержня в форме — 150 мм. При этом значения основных элементов электрической модели рассчитывались по следующим формулам:

$$R = \frac{1000}{6,72 \cdot 10^{-4} T - 0,029}, \text{ Ом};$$

$$c = 2016 \cdot 10^{-6} T^{0,3}, \text{ Ф};$$

где c — емкость конденсатора.

Значения сопротивлений теплоотдачи: $R_1=22$ Ом; $R_2=37,5$ Ом; $R_3=453$ Ом; $R_4=1920$ Ом; $R_5=8210$ Ом. На графике температур видны характерные моменты заполнения, связанные с местом расположения точек измерения и геометрией внутриформенного пространства (рис.3).

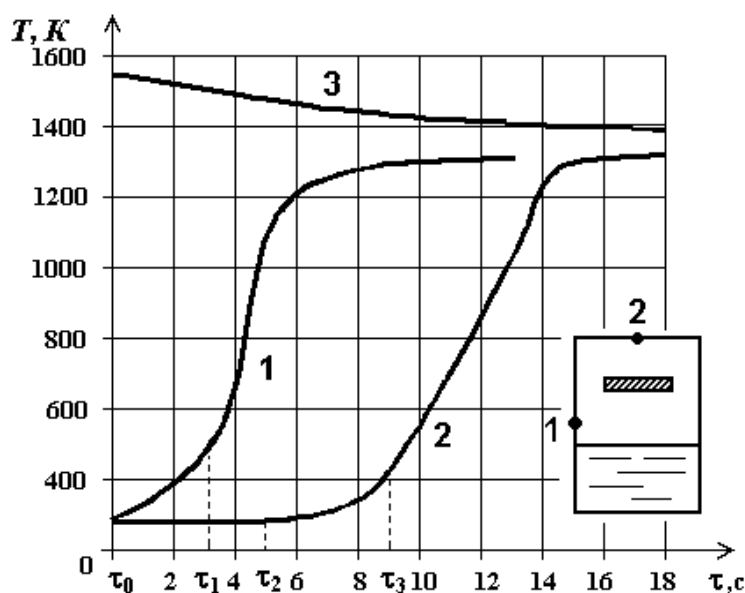


Рис. 3. Результаты моделирования нагрева формы при заполнении металлом

Отметка времени τ_0 соответствует началу заливки, τ_1 — подъему зеркала металла до точки 1, τ_2 — выходу точки 2 из тени стержня, τ_3 — окончанию заливки.

Разработанная модель позволяет проектировать технологию литейной формы, исключаящую образование дефектов отливок по вине литейной формы.

Литература

1. Данилюк И.И. О задачах со свободной (неизвестной) границей // Уравнения в частных производных и задачи со свободной границей. — К.: Наук. думка, 1983. — С. 3 — 5.
 2. Серебро В.С. Основы теории газовых процессов в литейной форме. — М.: Машиностроение, — 1991.
 3. Серебро В.С. Процессы тепло- и массопереноса при формировании отливки. — К.: УМК ВО, 1992.
 4. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. — Л.: Энергия, 1976.
 5. Никитенко Н.И. Исследование процессов тепло- и массообмена методом сеток. — К.: Наук. думка, 1978.
 6. Никитенко Н.И. Сопряженные и обратные задачи тепломассопереноса. — К.: Наук. думка, 1988.
 7. Становский А.Л. Повышение качества проектирования специальных способов литья — Автореферат дисс. ... докт. техн. наук. — М.: МГТУ им. Баумана, 1992.
-